

шить физическим экспериментом.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что автором получены новые научно обоснованные результаты, направленные на создание методов моделирования и расчета высотных зданий и сооружений с учетом реальной работы конструкций на всех стадиях жизненного цикла.

Разработанный теоретический аппарат, реализующий основные закономерности нелинейного деформирования конструкций зданий и сооружений, явился основой разработки практических алгоритмов и рекомендаций по проектированию и расчету зданий и сооружений.

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Основными проблемами моделирования являются сложность создания конечно-элементной модели, недостаточность и проблематичность описания вероятностных процессов нагружения, недостаточные знания о реологических свойствах материала, особенностях сложного и циклического нагружения и многое др.

Надежность и безопасность зданий и сооружений все более связывается с формированием научных подходов моделирования действительной работы конструкций для нормального и аварийного режимов эксплуатации. Важным вопросом становится возможность контроля процесса деформирования и накопления повреждений материалами конструкций с течением времени, и, как следствие, изменение схемы работы конструктивной системы в целом, а также возможного разрушения конструктивных узлов, переход сооружения в аварийное состояние с вероятностью обрушения. Внедрение в практику проектирования конструкций учета процессов изменения НДС на всех этапах жизненного цикла дает возможность уже на стадии проектирования выполнить достоверную оценку НДС и провести многовариантные численные эксперименты.

В статье предлагаются разработанные численные методы, позволяющие осуществлять моделирование процесса всего жизненного цикла зданий и сооружений, включая стадии возведения, реологические процессы на стадии эксплуатации, процесс приспособляемости конструктивной системы к изменяющимся нагрузкам в случае форс-мажорных ситуаций.

Достаточно часто конструкторы, создавая расчетную схему здания, вводят ряд различных допущений. При этом, вводимые при переходе от реального объекта к его расчетной схеме упрощения не должны существенно влиять на точность и достоверность получаемых результатов. В процессе проведения ряда численных экспериментов были выявлены некоторые эффекты, приводя-

щие к некорректной оценке НДС, и даны рекомендации по устранению подобных эффектов.

Для полного и достоверного описания напряженно-деформированного состояния любого здания и сооружения, необходимо не только с высокой точностью определить внешние воздействия, но и правильно произвести переход от реального объекта к его расчетной модели/схеме. Проведена классификация процессов, влияющих на формирование (изменение) НДС конструкций зданий и сооружений на протяжении жизненного цикла и разработана и применена методика теории упругости, позволяющих их учесть на основополагающей стадии – стадии проектирования (табл. 1).

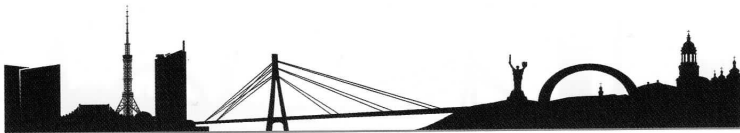
В физически нелинейных задачах отсутствует линейная зависимость между напряжениями и деформациями [1, 5]. Материал конструкции подчиняется нелинейному закону деформирования (нелинейная упругость). Моделирование физической нелинейности (нелинейной упругости) материалов конструкций производится с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию из развитой библиотеки законов деформирования материалов (зависимостей « $\sigma$ – $\varepsilon$ »). Библиотека законов деформирования позволяет учитывать практически любые нелинейные свойства материала. Существует несколько методов для решения нелинейных задач различных типов: шаговый метод, метод секущих, итерационный метод.

Стадией, формирующей НДС, является стадия возведения здания. Конструктивная схема строительного объекта изменяется в зависимости от последовательности возведения, что обуславливает изменение конструктивной и расчетной схемы здания и его НДС во времени. В процессе возведения конструктивная схема сооружения может многократно изменяться, усиливая и перемещая «замораживаться», определяя сечения элементов и конструкции узлов именно на этой стадии.

При возведении монолитных железобетонных конструкций важным эффектом, который необхо-

Таблица 1. Классификация процессов жизненного цикла, влияющих на НДС конструкций

Процессы жизненного цикла	Описание	Тип нелинейности
Процесс нагружения	Отслеживание начальных стадий линейно-упругой работы конструкции, стадий последовательного развития трещин в бетоне и растянутой арматуре, стадий, непосредственно предшествующих разрушению	Физическая, геометрическая, конструктивная
Процесс возведения	НДС определяется для всех последовательно сменяющихся конструктивных схем, соответствующих этапам возведения и модель сводной конструкции «хранит память» об истории возведения	Генетическая, физическая, конструктивная
Процессы эксплуатационной стадии	Моделирование реологических процессов изменения НДС конструкции при длительной нагрузке, связанных с ползучестью и изменением свойств во времени	Физическая, геометрическая
Процессы запроектных воздействий	Моделирование процессов «приспособляемости» конструкции при «форс-мажорных» ситуациях, когда при внезапном выходе из строя одного или нескольких элементов конструкция пытается приспособиться к новой ситуации, изменив (иногда за счет потери эксплуатационных качеств) свою первоначальную конструктивную схему, не допустив обрушения всего сооружения	Физическая, геометрическая



димо учитывать при численном моделировании, являются нелинейные свойства бетона, т.е. изменение жесткостных характеристик в процессе нагружения (ползучесть, трещины) [2 - 4].

Кроме того, в процессе монтажа переход к новой стадии часто осуществляется, когда возведенная на предыдущих стадиях конструкция еще не набрала проектной 28-дневной прочности. Это также обуславливает необходимость учета нелинейных эффектов, так как от стадии к стадии меняется жесткость возводимых элементов, в соответствии с временем их возведения. Численное моделирование процесса возведения представляется нелинейной задачей, даже если не учитывать эффекты, связанные с нелинейными свойствами бетона. В процессе возведения проявляется генетическая нелинейность, обусловленная изменением конструктивной схемы. Такая нелинейность вызвана тем, что НДС мгновенно возведенной конструкции не эквивалентно НДС конструкции, полученной на основе учета всей истории возведения (изменение расчетной схемы, возникновение и снятие монтажных опор и т.д.)

Методика, позволяющая производить расчеты с учетом последовательности возведения, основывается на модификации и усовершенствовании метода последовательных нагружений. Метод последовательных нагружений является одной из разновидностей шагового метода. Система нелинейных уравнений, описывающих нелинейную задачу, выглядит следующим образом:

$$A_u = f, \quad (1)$$

где:  $A$  – нелинейный оператор задачи;  $u$  – вектор искомых перемещений;  $f$  – вектор внешних нагрузок.

Идея шагового метода заключается в замене нелинейных уравнений (1) рекуррентной последовательностью линейных, которые на  $m$ -м шаге имеют вид

$$\begin{aligned} A_m \Delta u_{m+1} &= \Delta \beta_{m+1} f; \\ u_{m+1} &= u_m + \Delta u_{m+1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $A_m$  – линейный оператор, в развернутом виде имеющий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_1}{\partial u_1} u_m \quad \frac{\partial \psi_1}{\partial u_j} u_m \quad \frac{\partial \psi_1}{\partial u_n} u_m \\ \frac{\partial \psi_l}{\partial u_1} u_m \quad \frac{\partial \psi_l}{\partial u_j} u_m \quad \frac{\partial \psi_l}{\partial u_n} u_m \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial u_1} u_m \quad \frac{\partial \psi_n}{\partial u_j} u_m \quad \frac{\partial \psi_n}{\partial u_n} u_m \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\psi_l (l=1, 2, \dots, n)$  – нелинейные операторы, т.е. I уравнение системы  $A_u = f$  выглядит как  $\psi_l(u_1, u_2, \dots, u_n) = P$ ;  $t$  – параметр нагрузки.

Суть модификации метода заключается в том, что параметр  $t$  вводится к нагрузке  $P$ . При  $t = 0$  легко определяется начальное решение  $u_0$ , при  $t = 1$  система превращается в исходную. Последовательно изменяя  $t$  от 0 до 1, находим приближенное решение. Вычислительная схема на каждом шаге полу-

чается из следующих соображений: введем гипотезу, что на  $m$ -м этапе  $t = t_m$  известно решение, т.е.

$$A u_m = t_m f. \quad (4)$$

Изменим  $t_m$  на величину  $\Delta t_{m+1}$  так, чтобы  $t_{m+1} = t_m + \Delta t_{m+1}$  была ближе к единице, чем  $t_m$ . Тогда:

$$A(u_m + \Delta u_{m+1}) = (t_m + \Delta t_{m+1}) f. \quad (5)$$

Разложим левую часть (6) в ряд Тейлора, тогда:

$$A u_m + \sum_{i=1}^k \frac{1}{i!} \left( \frac{\partial^i}{\partial u^i} A u_m \Delta u_{m+1}^i \right) + R_k = t_m f + \Delta t_{m+1} f. \quad (6)$$

Пренебрегая квадратами и высшими степенями  $\Delta u_{m+1}$  (величина  $\Delta t$  должна допускать эту процедуру) и с учетом (6) получим линеаризованную систему для нахождения  $\Delta u_{m+1}$ , т.е.

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta t_{m+1} f, \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1} \quad (7)$$

где  $A_m$  – линейный оператор ( $A_m = \frac{d}{du} A|_{u_m}$ ).

Напряжения определяются по формуле, аналогичной (7):

$$\{\sigma\}^{m+1} = \{\sigma\}^m + \{\Delta\sigma\}^m \quad (8)$$

Для малых этапов нагружения используется значение касательного модуля деформации, вычисляется по напряженно-деформированному состоянию конструкции, предшествующей ступени нагружения. Для изотропных материалов для определения касательного модуля деформаций используется следующий подход. При коэффициенте Пуассона, отличном от 0,5, псевдоупругие параметры вычисляются по формулам (5):

$$E_{k(m)}^* = E_k^{m-1} / \Omega_k \quad (9)$$

$$v_{k(m)}^* = \left[ \frac{1+\nu}{3} - \frac{(1-2\nu) E_k^{m-1}}{3E_0} \right] / \Omega_k \quad (10)$$

где  $E_0$ ,  $\nu$  – начальный модуль упругости и коэффициент Пуассона;  $E_k$  – касательный модуль обобщенной кривой деформирования;

$$\Omega_k = \left[ \frac{2(1+\nu)}{3} + \frac{1-2\nu}{3E_0} E_k^{m-1} \right] \quad (11)$$

Если на  $m$ -м этапе происходит разгрузка, то для расчета принимается начальный модуль упругости  $E_0$ .

Предлагается более общий подход, основанный на зависимости  $\sigma_i = \sigma(\varepsilon_i)$ , где  $\sigma_i$  – эквивалентные напряжения,  $\varepsilon_i$  – эквивалентные деформации. В этом случае касательный модуль деформации определяется, как  $(\partial \sigma_i) / (\partial \varepsilon_i)$ .

В физическом смысле этот процесс можно трактовать как постепенное увеличение нагрузки, начинающееся от 0 и заканчивающееся заданным  $f$ .

Предлагается следующий алгоритм учета стадий последовательного возведения. Разбивается сооружение на  $n$  стадий (этажей), согласно использу-



емой технологии возведения. Первоначально считается возведенной первая стадия (этаж), производится расчет его напряженно-деформированного состояния в линейно-упругой постановке с начальным модулем  $E_0$ . Далее предполагаем возведенными две стадии. Снова рассчитываем напряженно-деформированное состояние, но теперь учитываем нагрузки, возникшие во второй стадии. При этом, формируя матрицу жесткости второй стадии, воспользуемся значениями касательных модулей упругости, полученными из расчета последовательных нагружений для предыдущего этапа возведения сооружений  $E_c$  и  $\nu_c$ , а для первой стадии (ранее возведенной) – значениями  $E_0$  и  $\nu_0$ . При этом, в возведенной стадии вычисляются касательные модули упругости и коэффициенты Пуассона. Аналогично поступаем, когда считаем возведенными 3, 4, ..., n стадии, до тех пор, пока расчет не будет охватывать всё сооружение. Компоненты напряжений и перемещений, полученные от воздействия нагрузок на каждой стадии, суммируются.

Описанные методики реализованы в программном комплексе ЛИРА-САПР.

К процессам жизненного цикла, происходящим в эксплуатационной стадии, прежде всего относятся реологические процессы изменения НДС конструкции при длительной нагрузке, связанные с ползучестью и изменением свойств бетона во времени.

Технология расчета конструкций с учетом ползучести бетона выглядит следующим образом:

- выполняется расчет в линейной постановке на все виды нагружений (статические, силовые, статические деформационные, динамические);
- определяются расчетные сочетания усилий или расчетные сочетания нагружений;
- выполняется подбор арматуры в сечениях стержневых или пластинчатых элементов;
- производится унификация армирования элементов;
- по результатам армирования формируются новые жесткостные характеристики конструктивных элементов для последующего нелинейного расчета;
- задаются параметры ползучести бетона, учитывающие влажность и усадку бетона;
- назначается нагружение, на которое будет производиться расчет с учетом ползучести бетона;
- выполняется расчет для заданных промежутков времени. На каждом этапе расчета для каждого элемента определяется новая жесткость, которая зависит от напряжения бетона в этом элементе и заданных параметров ползучести. Новые переменные жесткости получают в точках интегрирования как по сечению, так и по конечному элементу, в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом этапе определяются усилия, перемещения и новые жесткости по касательному модулю деформации для заданного промежутка времени.

Моделирование процесса старения бетона, по сути, является нелинейной задачей, обусловленной учетом свойств материала (физическая нелинейность). Решение этой задачи в ПК ЛИРА САПР

основано на основных методах теории прочности бетона, которые в физическом смысле представляют собой реализацию законов нелинейного деформирования материалов по различным теориям.

## ВЫВОДЫ

Для современных сложных сооружений (мосты, большепролетные покрытия, высотные здания и др.), как правило, конструктивная схема обуславливается не только упругим расчетом, но и процессами изменения напряженно-деформированного состояния во времени. В процессе жизненного цикла конструктивная схема сооружения многократно изменяется, усилия и перемещения перераспределяются, значительно повышая вероятность трещинообразования и возникновения аварийной ситуации.

Для изучения физической системы методами численного моделирования ее заменяют абстрактной системой - математической моделью.

Реализация математической модели на компьютере дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложных систем, заменяя, таким образом, экспериментальные исследования численным экспериментом. Кроме того, при решении ряда сложных конструкторских задач необходимо применение вариантного проектирования.

На современном этапе развития компьютерной техники разработано множество программных комплексов (ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР, STARK, COSMOS, ANSYS, NASTRAN и др.), реализующих метод конечных элементов и позволяющих производить расчеты сложных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / Городецкий А.С., Евзеров И.Д. – М.: Изд-во «АСВ», 2009. – 360 с.
2. Барабаш М.С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий / М.С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – М.: Изд-во «АСВ», 2012. – Vol. 8, Issue 3. – P. 58 - 68.
3. Барабаш М.С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: монография / Мария Сергеевна Барабаш – К.: Сталь, 2014. – 301 с.
4. Барабаш М. С. Численное моделирование НДС конструкций с учетом стадий жизненного цикла зданий и сооружений / М. С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – М.: Изд-во «АСВ», 2015. – Vol. 11, Issue 1. – P. 80 - 90.
5. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Бате К., Вилсон Э.; пер. с англ. - М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.

